

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.778; 621.884
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-54-62



ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВОК НА ВЕЛИЧИНУ НАПРЯЖЕНИЙ В ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ ХОЛОДНОЙ ВЫСАДКЕ ЗАКЛЕПОК

Бурлаков И.А.^{1,2}, Деметрашвили И.С.³, Харитонов С.А.⁴

¹Филиал АО «ОДК» «ОДК-Салют», Москва, Россия

²Московский политехнический университет (Мосполитех), Москва, Россия

³Филиал АО «ОДК» «НИИД», Москва, Россия

⁴Машиностроительное конструкторское бюро «Горизонт» (Филиал АО «ОДК» «МКБ „Горизонт”»), Дзержинский, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Необходимость повышения стойкости инструмента для холодной высадки заклепок, широко применяемых в авиационной промышленности. Высокие циклические нагрузки приводят к разрушению оснастки, а использование составного инструмента с бандажированными твердосплавными вставками требует оптимизации его параметров, в частности величины натяга, с учетом свойств высаживаемого материала. **Цель исследования.** Определение влияния прочности материала заготовок на напряженное состояние составного пуансона и разработка методики выбора рационального натяга в оснастке. **Используемые методы.** Методом конечно-элементного моделирования в среде QForm 11.2.400.3 изучен процесс холодной высадки заклепок из шести материалов: никелевого сплава ХН60ВТ, стали 12Х18Н10Т, меди М1 и алюминиевых сплавов АД0, Д16, АМг5. Проведены натурные эксперименты по высадке заклепок с регистрацией силовых параметров для проверки моделей. **Новизна.** Принципиальной новизной является следующее: при высадке более мягких алюминиевых сплавов в пуансоне возникают более высокие сжимающие напряжения (до 1300 МПа), чем при работе с более прочными материалами, такими как сталь или никелевый сплав (до 850 МПа). Это благоприятно сказывается на стойкости твердосплавной вставки, работающей преимущественно на сжатие. На основе аналитической модели толстостенных цилиндров (Ламе) разработана расчетная методика, связывающая предел текучести материалов заклепки и инструмента, его свойства и геометрию, которая позволяет определить диапазон рациональных натягов, исключающих как сдвиг вставки, так и пластическую деформацию обоймы. **Практическая значимость.** Получение инженерной модели, позволяющей при проектировании оснастки учитывать прочностные характеристики конкретного заклепочного материала для выбора рационального натяга, что повышает ресурс инструмента и технологическую надежность процесса.

Ключевые слова: холодная высадка, заклепка, составной инструмент, напряжения в инструменте, натяг, заклепочные материалы, моделирование, твердый сплав, QForm 11.2.400.3

© Бурлаков И.А., Деметрашвили И.С., Харитонов С.А., 2026

Для цитирования

Бурлаков И.А., Деметрашвили И.С., Харитонов С.А. Влияние прочности материала заготовок на величину напряжений в инструменте при холодной высадке заклепок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 54-62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-54-62>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF BLANK MATERIAL STRENGTH ON TOOL STRESSES DURING COLD HEADING OF RIVETS

Burlakov I.A.^{1,2}, Demetrashvili I.S.³, Kharitonov S.A.⁴

¹Branch of JSC UEC Salut, Moscow, Russia

²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

³Branch of JSC UEC NIID, Moscow, Russia

⁴Gorizont Machine-Building Design Bureau (Branch of JSC UEC Gorizont Machine-Building Design Bureau), Dzerzhinsky, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The research is aimed at improving the durability of tooling for cold heading of rivets, which are widely used in the aerospace industry. High cyclic loads result in tooling failure, while the use of a composite tool with shroud carbide inserts requires optimization of its parameters, particularly the interference fit value, taking into account the properties of the material being headed. **Objectives.** The research is aimed at determining the effect of blank material strength on the stress state of a composite puncheon and developing a methodology for selecting an optimal interference fit. **Methods Applied.** Finite element modeling in QForm 11.2.400.3 has been used to investigate the cold heading of rivets made of six materials: KhN60VT nickel alloy, 12Kh18N10T stainless steel, M1 copper, and AD0, D16, and AMg5 aluminum alloys. Full-scale experiments on rivet heading have been conducted with recording of force parameters to validate the models. **Originality.** The principal novelty of the study is that heading softer aluminum alloys generates higher compressive stresses in the puncheon (up to 1300 MPa) than heading stronger materials such as steel or nickel alloy (up to 850 MPa). This has a beneficial effect on the service life of the carbide insert, which operates predominantly under compression. Based on the analytical model of thick-walled cylinders (Lamé's equations), a calculation methodology has been developed that relates the yield strengths of the rivet and tool materials, their properties, and geometry, making it possible to determine a range of optimal interference values that prevent both insert displacement and plastic deformation of the outer sleeve. **Practical Relevance.** The proposed engineering model makes it possible to account for the strength characteristics of a specific rivet material when designing tooling and selecting an optimal interference fit, thereby increasing tool life and process reliability.

Keywords: cold heading, rivet, composite tool, tool stresses, interference fit, rivet materials, modeling, carbide, QForm 11.2.400.3

For citation

Burlakov I.A., Demetrashvili I.S., Kharitonov S.A. Influence of Blank Material Strength on Tool Stresses During Cold Heading of Rivets. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 54-62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-54-62>

Введение

Изготовление клепаных высокопрочных соединений из алюминиевых, титановых и жаропрочных стальных листов является непростой задачей, которая зависит от ряда факторов, в том числе и от качества получаемых заклепок, которое определяется механическими характеристиками штампуемого металла, силовыми параметрами процесса высадки и конструкцией применяемой штамповой оснастки [1]. Ряд авторов отмечают [2], что в настоящее время невозможно решить задачи обеспечения высокого качества соединений без учета формирования заданных свойств крепежного узла путем комплексного анализа всей конструкторско-технологической цепочки проектирования. Одним из критически важных этапов данной цепочки является изготовление заклепок методом холодной высадки. Как правило, ее производят на холодновысадочных автоматах, которые имеют большую производительность, достигающую 300–400 заготовок в минуту и этим обуславливаются высокие требования к эксплуатационной стойкости инструмента.

Высокие ударные нагрузки приводят к износу и разрушению формообразующих частей инструмента. Наряду с такими известными способами повышения работоспособности оснастки, как применение дорогих высокопрочных материалов, использование электроэрозионного легирования, поверхностной термической обработки, лазерного упрочнения и нанесения износостойких покрытий, широко применяют метод изготовления составного инструмента, включающего в себя вставку из твердого сплава типа ВК10 или ВК15, бандажированную с натягом высокопрочной обоймой. Это позволяет существенно снизить вероятность появления критических для твердого сплава растягивающих напряжений и уменьшить вероятность выхода из строя формообразующего инструмента [3]. Несмотря на эффективность данного способа повышения стойкости высадочного инструмента, в литературе имеется весьма ограниченное количество информации, касающейся влияния величины натяга на напряженное состояние инструмента, динамики напряжений в твердосплавных вставках в про-

цессе высадки деталей и зависимостей напряженного состояния инструмента от прочности материала высаживаемых заклепок. Решению данных вопросов посвящено настоящее исследование.

Целью работы являлось определение влияния прочностных характеристик основных материалов заклепок на напряжения, возникающие в формообразующем инструменте.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- найдены реологические зависимости заклепочных (никелевого сплава ХН60ВТ, жаропрочной стали 12Х18Н10Т, меди М1 и алюминиевых сплавов АД0, Д16 и АМг5) и инструментальных (ВК15 и 4Х5МФ1С) материалов и выполнено моделирование процесса холодной высадки с применением программного комплекса QForm 11.2.400.3 из исследуемых материалов с определением силовых параметров и напряженного состояния в инструменте (на примере пуансона);

- разработана расчетная модель для определения рациональной величины натяга в составном инструменте, обеспечивающего его работоспособность при высадке заклепок из материалов с различными прочностными характеристиками;

- осуществлена экспериментальная высадка заклепок из исследуемых деформируемых материалов с

регистрацией силовых параметров и выполнен сравнительный анализ данных, полученных моделированием и натурными испытаниями.

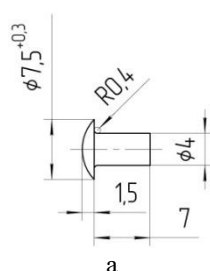
Материалы и методы исследования

Реологические модели жаропрочной стали 12Х18Н10Т и алюминиевых сплавов Д16 и АД0 были взяты из базы данных программного комплекса QForm [4]. Характеристики меди М1 [5], сплава АМг5 [6] и никелевого сплава ХН60ВТ были определены авторами ранее и верифицированы в ходе натурных экспериментов [7, 8]. Модель инструментальной стали 4Х5МФ1С также была выбрана из базы данных QForm; модель сплава ВК15 – из литературных источников [9, 10].

Экспериментальные цилиндрические образцы диаметром 4,0 мм и высотой 10,85 мм изготовили из исследуемых материалов электроэрозионной резкой. Высадку осуществили на испытательной машине модели LFM 250 с применением серийной оснастки со скоростью перемещения инструмента 2 мм/мин, фиксируя диаграммы «сила – ход».

Получаемые детали показаны на **рис. 1**.

Вставки матрицы 1 (**рис. 2**) и пуансона 3 изготовлены из твердого сплава ВК15, обойма 5 – из стали 4Х5МФ1С.



ХН60ВТ



М1
б



АМг5

Рис. 1. Изготавливаемая деталь: а – эскиз; б – высаженные заклепки

Fig. 1. Manufactured part: a is sketch; b is headed rivets

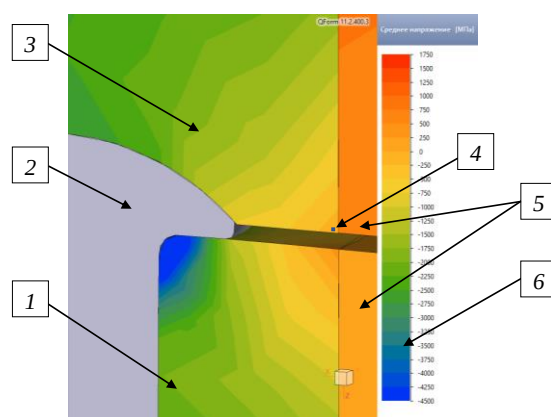


Рис. 2. Распределение напряжений в инструменте при холодной высадке заклепок: 1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – пуансон; 4 – трассируемая точка; 5 – бандажирующая обойма; 6 – шкала средних напряжений

Fig. 2. Stress distribution in the tool during cold heading of rivets: 1 is die; 2 is blank; 3 is punch; 4 is monitored point; 5 is outer sleeve; 6 is mean stress scale

Моделирование выполнили с учетом режимов натурального эксперимента с условиями, что объем заготовки неизменный, напряженное состояние трехмерное (3D-расчет), температура формообразования – 20°C, а фактор трения равен 0,2 (по закону трения Ливанова). Расчет выполнили с величинами натяга 0, 0,05, 0,1 и 0,15 мм. Напряжения в инструменте анализировали методом трассируемых точек. Суммарное количество объемных узлов составило 7 399–8 222. Анализ провели на пуансоне с учетом его более низкой стойкости.

Разработка расчетной модели для определения рационального натяга. На основе анализа напряженно-деформированного состояния составного инструмента и условий его работоспособности авторами разработана расчетная модель. Данная модель представляет собой систему уравнений, позволяющую определить диапазон рациональных натягов δ , обеспечивающих требуемую несущую способность соединения «обойма–вставка» без риска повреждения оснастки.

Модель основана на двух основных критериях:

1. Условие отсутствия сдвига вставки: сила трения на посадочной поверхности должна превышать осевую силу высадки.

2. Условие прочности обоймы: контактное давление от натяга не должно вызывать пластическую деформацию бандажирующей обоймы.

Система связывает воедино ключевые технологические и конструктивные параметры:

– свойства материала заготовки – предел текучести $\sigma_{\text{т.закл}}$, необходимый для расчета технологической силы высадки и, соответственно, минимального требуемого контактного давления;

– свойства материалов инструмента – модули упругости обоймы и вставки E_1, E_2 соответственно; коэффициенты Пуассона обоймы и вставки μ_1, μ_2 соответственно и предел текучести материала обоймы $\sigma_{\text{т.об}}$, определяющие упругую реакцию сборки на натяг и предельно допустимую нагрузку;

– геометрию оснастки – диаметр вставки d , наружный диаметр обоймы D и посадочную длину L , которые влияют на площадь контакта и концентрацию напряжений;

– коэффициенты процесса – коэффициент формы инструмента $k = 1,8$, установленный на основе анализа энергосиловых параметров высадки, и коэффициент трения покоя f в паре «обойма–вставка» (переменный).

Таким образом, на основе анализа известных решений теории упругости для толстостенных цилиндров (формула Ламе) и собственных экспериментальных данных разработана методика выбора рациональных параметров составного инструмента – натяга δ и диаметра обоймы D , учитывающая прочностные свойства высаживаемого материала через коэффициент $k = 1,8$.

Уравнения модели:

$$p_{\text{нат.мин}} \geq \frac{(p_{\text{тр.об}} d)}{(4Lf)}; \delta_{\text{мин}} = p_{\text{нат.мин}} d \left(\frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right).$$

$$p_{\text{нат.макс}} = \sigma_{\text{т.об}} \left(\frac{D^2 - d^2}{D^2 + d^2} \right); \delta_{\text{макс}} = p_{\text{нат.макс}} d \left(\frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right).$$

$$\delta_{\text{мин}} = \frac{(\sigma_{\text{т.закл}} kd)}{(4Lf)} d \left(\frac{\left(1 - \frac{\mu_1}{E_1}\right) + \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2\right)}{E_2} \right);$$

$$\delta_{\text{макс}} = \sigma_{\text{т.об}} \left(\frac{D^2 - d^2}{D^2 + d^2} \right) d \left(\frac{\left(1 - \frac{\mu_1}{E_1}\right) + \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2\right)}{E_2} \right).$$

Работоспособный диапазон натягов определяется неравенством

$$\delta_{\text{мин}} \leq \delta \leq \delta_{\text{макс}}.$$

Представленные на **рис. 3** зависимости давления на поверхности контакта обоймы и вставки от диаметра обоймы позволяют определить минимальный натяг для высадки заклепок с конкретными механическими свойствами. Как известно из классических работ, например Ландау и Лифшица [11], величина давления на поверхности p определяется как среднее скалярное значение нормальных напряжений. Кривые средних напряжений, найденные конечно-элементным моделированием в программе QForm для обоймы диаметром 25 мм при натяге 0,1 мм, показали хорошее совпадение с результатами, полученными с применением разработанной расчетной модели (**рис. 4**), что подтверждает ее корректность.

Анализ полученных данных

Результаты анализа напряжений в пуансоне в зависимости от величины натяга методом трассируемых точек показаны на **рис. 5**.

Анализ результатов расчета, приведенных на **рис. 5**, показывает, что при холодной высадке заклепок из алюминиевых сплавов (АД0, Д16 и АМг5) при наиболее широко применяемых натягах 0,05–0,10 пуансон испытывает в наиболее нагруженных точках 4 (см. **рис. 2**) значительно большие сжимающие напряжения (от 700 до 1300 МПа), чем медь М1, сталь 12Х18Н10Т и никелевый сплав ХН60ВТ (от 450 до 850 МПа), что должно положительно сказаться на стойкости оснастки при высадке деталей из алюминиевых сплавов.

Помимо сжимающих напряжений в твердосплавном инструменте, на его стойкость большое влияние, как отмечает ряд авторов [8], оказывает циклическое нагружение. Величина напряжений в процессе высадки (см. **рис. 5**) изменяется от 250 МПа (для стали 12Х18Н10Т) до 650 МПа (для сплава ХН60ВТ). Учитывая большое количество ходов в минуту холодновысадочных автоматов (до 400), большая амплитуда изменений напряжений в процессе циклического нагружения при высадке приводит к усталостному разрушению

твердосплавных вставок [8] и, следовательно, выход оснастки из строя при высадке заклепок из никелевого сплава ХН60ВТ более ожидаем, чем при изготовлении заклепок из стали 12Х18Н10Т.

Для проверки адекватности полученных результатов были проведены натурные испытания по высадке заклепок из рассматриваемых материалов с регистрацией параметров «сила-ход».

Полученные результаты (рис. 7) показали относительно хорошее совпадение с расчетными (средняя погрешность не превышала 8–12 %), что подтверждает адекватность использованных реологических моделей и корректность проведенного численного анализа.

Выполненная работа показывает, что при проектировании оснастки с применением вставок из твердого сплава для холодной высадки заклепок необходимо при определении натяга учитывать прочностные свойства заклепочного материала.

Заключение

1. С применением найденных реологических свойств высаживаемых материалов выполнено моделирование процесса холодной высадки в программном комплексе QForm 11.2.400.3. Моделирование с определением силовых параметров и напряженного состояния в инструменте (на примере пуансона) показало, что при высадке заклепок из алюминиевых сплавов (АД0, Д16 и АМг5) с наиболее распространенными натягами 0,05–0,10 мм пуансон испытывает в наиболее нагруженных точках 4 (см. рис. 2) значительно большие сжимающие напряжения (от 700 до 1300 МПа), чем при работе с медью М1, сталью 12Х18Н10Т и никелевым сплавом ХН60ВТ (от 450 до 850 МПа), которые должны положительно сказаться на стойкости оснастки при высадке деталей из алюминиевых сплавов.

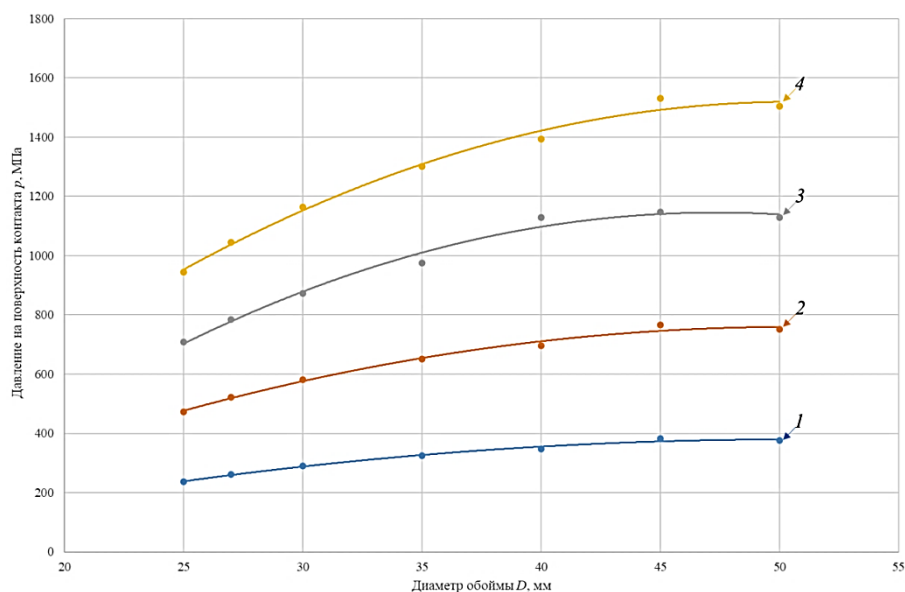


Рис. 3. Зависимости давления на поверхности контакта от диаметра обоймы из стали 4Х5МФС: 1 – $\delta = 0,05$ мм; 2 – $\delta = 0,10$ мм; 3 – $\delta = 0,15$ мм; 4 – $\delta = 0,20$ мм

Fig. 3. Dependence of contact surface pressure on the diameter of the 4Kh5MFC steel sleeve: 1 is $\delta = 0.05$ mm; 2 is $\delta = 0.10$ mm; 3 is $\delta = 0.15$ mm; 4 is $\delta = 0.20$ mm

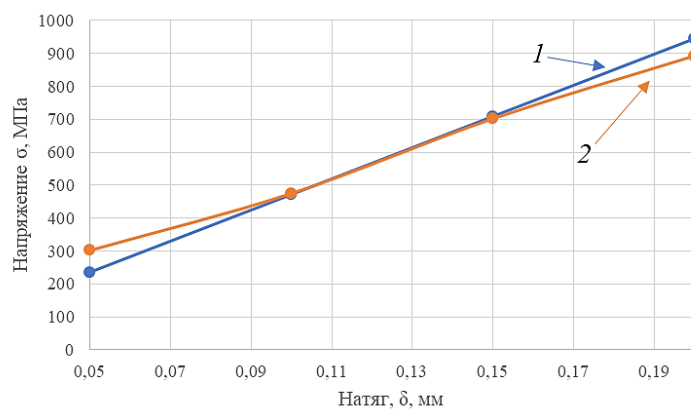


Рис. 4. Сравнение расчетных зависимостей: 1 – расчетная модель; 2 – конечно-элементная модель

Fig. 4. Comparison of the calculated relationships: 1 is analytical model; 2 is finite element model

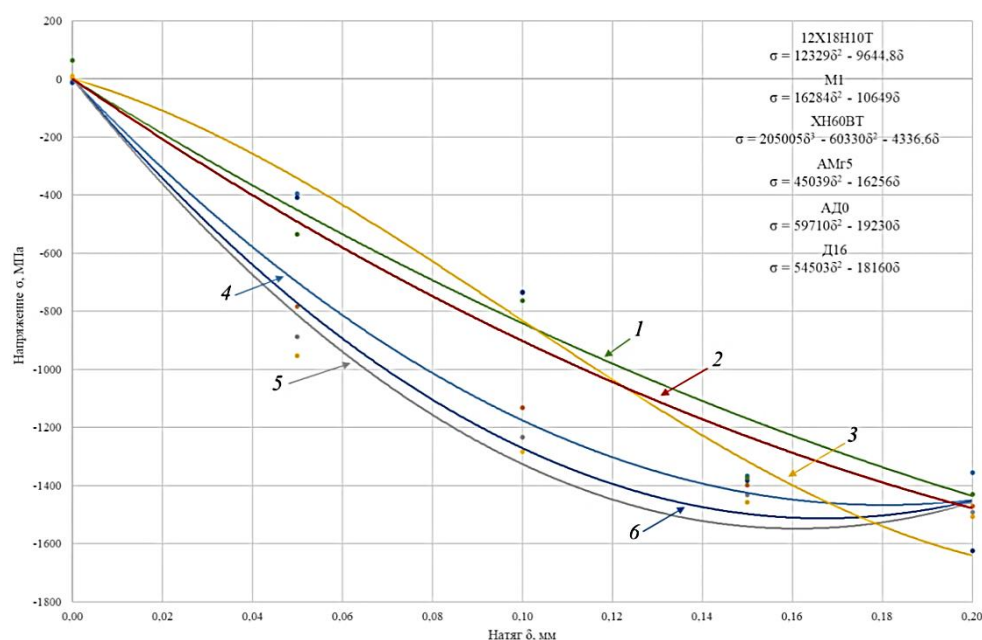


Рис. 5. Влияние натяга на напряжения в пуансоне: 1 – сталь 12Х18Н10Т; 2 – медь М1; 3 – никелевый сплав ХН60ВТ; 4 – алюминиевый сплав АМг5; 5 – алюминиевый сплав АД0; 6 – алюминиевый сплав Д16

Fig. 5. Effect of interference fit on stresses in the puncheon: 1 is 12Kh18N10T steel; 2 is M1 copper; 3 is KhN60VT nickel alloy; 4 is AMg5 aluminum alloy; 5 is AD0 aluminum alloy; 6 is D16 aluminum alloy

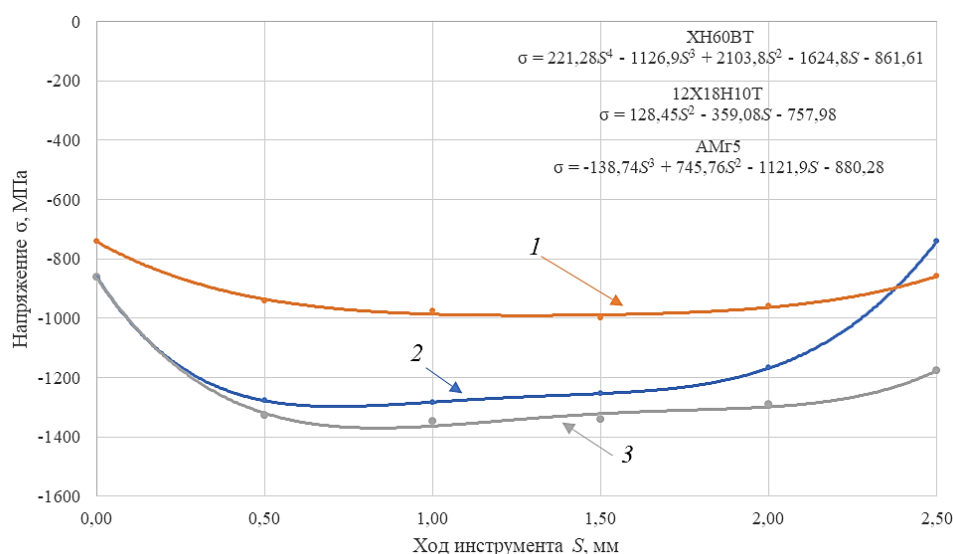


Рис. 6. Изменение напряжений в пуансоне в процессе высадки: 1 – сталь 12Х18Н10Т; 2 – никелевый сплав ХН60ВТ; 3 – алюминиевый сплав АМг5

Fig. 6. Variation of stresses in the puncheon during heading: 1 is 12Kh18N10T steel; 2 is KhN60VT nickel alloy; 3 is AMg5 aluminum alloy

2. Разработана расчетная модель, связывающая прочностные свойства материала заклепки, характеристики материалов инструмента и его геометрию. Модель позволяет рассчитать рациональную величину натяга в составном инструменте, обеспечивающую его надежную работу без пластической деформации обоймы или сдвига твердосплавной вставки.

3. Выполнен анализ напряженного состояния ин-

струмента по высадке заклепок, полученных моделированием и натурным экспериментом, показано их качественное и количественное совпадение. Показано, что моделирование с применением найденных реологических моделей материалов дает возможность проектировать оснастку с твердосплавными вставками с определением величины натяга с учетом прочностных свойств материала высаживаемых заклепок.

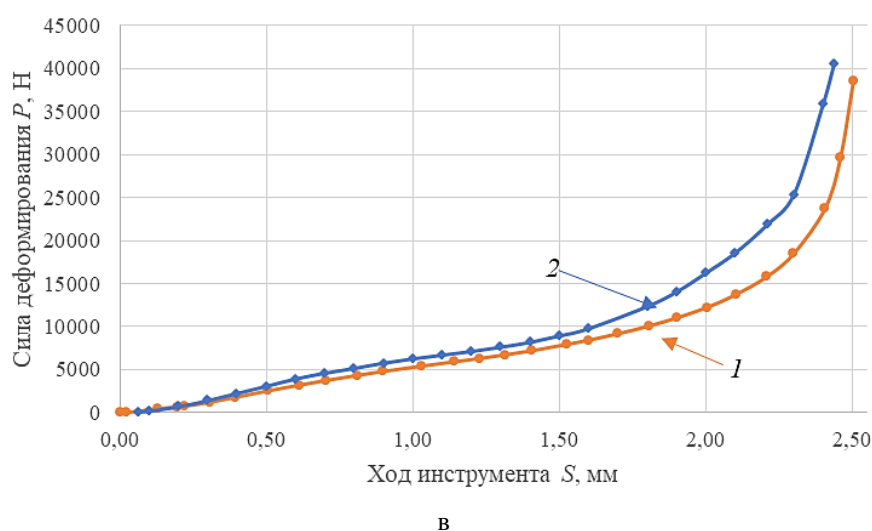
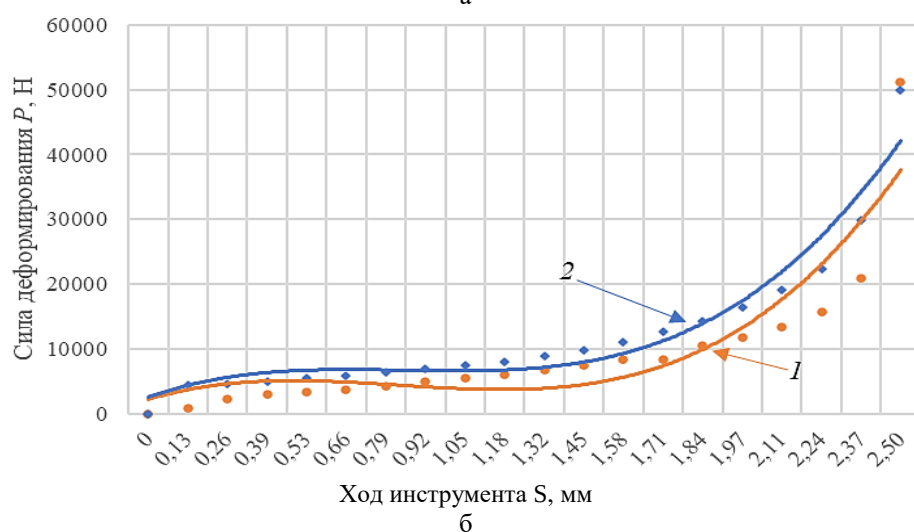
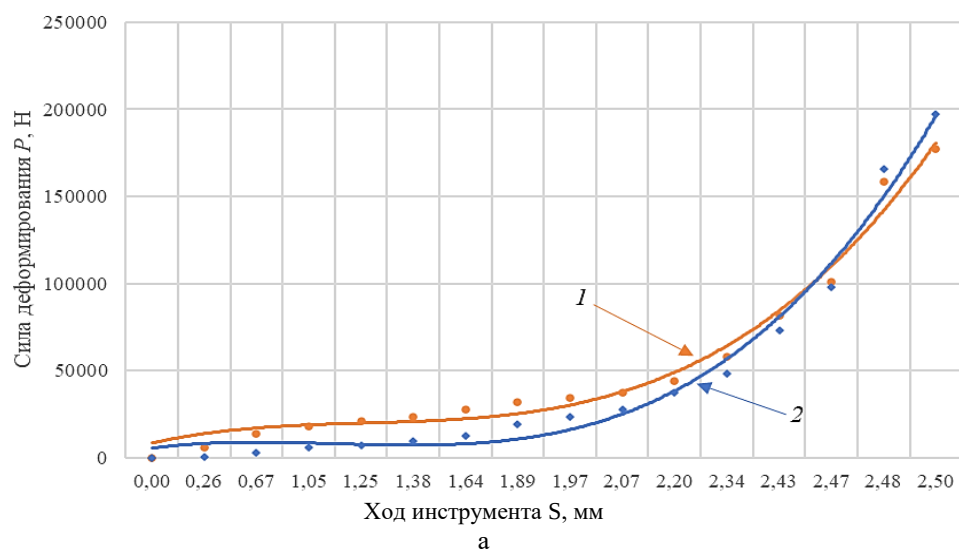


Рис. 7. Сравнение расчетных (1) и экспериментальных (2) сил формообразования заклепок из:
а – никелевого сплава ХН60ВТ; б – меди марки М1; в – алюминиевого сплава АМр5

Fig. 7. Comparison of calculated (1) and experimental (2) forming forces for rivets made of: a is KhN60VT nickel alloy; b is M1 copper; c is AMg5 aluminum alloy

Список источников

1. Данов А.С. О континуальной теории дефектов // Вопросы механики деформируемого твердого тела. 1984. Вып. 2. С. 33-37.
2. Данов А.С. Выбор параметров высокоресурсных соединений высокопрочными заклепками с компенсаторами и ограничительными элементами // Авиационно-космическая техника и технология. 2015. № 10 (127). С. 11-14.
3. Степанкин И.Н. Стойкость холодновысадочной оснастки и методы ее повышения. Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2014. 197 с.
4. Руководство пользователя системы QFORM (в электронном виде), ООО «КванторФорм», 2023.
5. Определение реологической модели меди М1 / А.Д. Куликов, П.А. Петров, И.С. Деметрашвили и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 9. С. 722-731.
6. Построение кривых текучести алюминиевого сплава АМг5 на основе натурного и вычислительного эксперимента / П.А. Петров, Фам Ван Нгок, И.А. Бурлаков и др. // Технология легких сплавов. 2022. № 2. С. 65-74.
7. Грибов Е.В., Иванов С.Ю. Напряженное состояние составного инструмента с твердосплавной вставкой при холодном выдавливании // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/napryazhennoe-sostoyanie-sostavnogo-instrumenta-s-tverdospлавной-vstavkoy-pri-holodnom-vydavlivanii> (дата обращения: 06.11.2025).
8. Смирнов С.В., Петренко В.А. Особенности разрушения твердых сплавов при циклическом нагружении // Вестник машиностроения. 2018. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrusheniya-tverdyh-splavov-pri-tsiklicheskom-nagruzhении> (дата обращения: 06.11.2025).
9. ТУ 48-19-209-88. Сплавы твердые спеченные. Заготовки изделий из вольфрамовых особомелкозернистых твердых сплавов марок ВК10-ХОМ и ВК15-ХОМ.
10. ГОСТ 3882-74. Сплавы твердые спеченные. Марки. М.: Изд-во стандартов, 2008. 12 с.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов. В 10 т. Т. VII. Теория упругости. 5-е изд., стер. М.: Физматлит, 2003. 264 с.
- mechanics of deformable solids]. 1984;(2):33-37. (In Russ.)
2. Danov A.S. Selection of parameters for high-endurance joints with high-strength rivets featuring compensators and limiting elements. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace engineering and technology]. 2015;(10(127)):11-14. (In Russ.)
3. Stepankin I.N. *Stoikost kholodnovysadochnoi osnastki i metody ee povysheniya* [Durability of cold heading tooling and methods for its improvement]. Gomel: P.O. Sukhoi State Technical University of Gomel Publishing House, 2014, 197 p. (In Russ.)
4. QFORM System User Guide (electronic version), QuantorForm Ltd., 2023.
5. Kulikov A.D., Petrov P.A., Demetrashvili I.S. et al. Determination of the rheological model for M1 copper. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. 2024;(9):722-731. (In Russ.) doi: 10.24412/2071-6168-2024-9-722-723
6. Petrov P.A., Pham Van Ngok, Burlakov I.A. et al. Construction of flow curves for AMg5 aluminum alloy based on full-scale and computational experiment. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2022;(2):65-74. (In Russ.)
7. Gribov E.V., Ivanov S.Yu. Stress state of a composite tool with a hard-alloy insert in cold extrusion. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Material forming]. 2019;(1). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/napryazhennoe-sostoyanie-sostavnogo-instrumenta-s-tverdospлавной-vstavkoy-pri-holodnom-vydavlivanii> (Accessed on November 11, 2025).
8. Smimov S.V., Petrenko V.A. Features of hard alloy fracture under cyclic loading. *Vestnik Mashinostroyeniya* [Vestnik of Mechanical Engineering]. 2018;(5). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrusheniya-tverdyh-splavov-pri-tsiklicheskom-nagruzhении> (Accessed on November 11, 2025).
9. Technical Specification TU 48-19-209-88. Sintered hard alloys. Blanks for products made of tungsten extra-fine-grained hard alloys of VK10-KhOM and VK15-KhOM grades.
10. State standard GOST 3882-74 (ISO 513-75). Sintered hard alloys. Grades. Moscow: Standards Publishing House, 2008, 12 p. (In Russ.)
11. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika: ucheb. posobie dlya vusov* [Theoretical Physics: study guide for universities]. Volume 7: Theory of Elasticity. Moscow: Fizmatlit, 2003, 264 p. (In Russ.)

References

Поступила 09.02.2026; принята к публикации 11.03.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 09/02/2026; revised 11/03/2026; published 30/09/2026

Бурлаков Игорь Андреевич – доктор технических наук, главный специалист УГТ, Филиал АО «ОДК» «ОДК-Салют», Москва, Россия.
Email: iaburlakov@gmail.com. ORCID 0000-0002-9427-0217

Деметрашвили Ирина Сергеевна – инженер-технолог 1-й категории, Филиал АО «ОДК» «НИИД», Москва, Россия.
Email: i.demetrashvili@uecrus.com. ORCID 0009-0002-2363-0198

Харитонов Сергей Александрович – начальник технологического бюро,
Филиал АО «ОДК» «МКБ „Горизонт”», Дзержинский, Россия.
Email: s.Kharitonov@uecrus.com

Igor A. Burlakov – PhD, Chief Specialist,
Branch of JSC UEC Salut, Moscow, Russia
Email: iaburlakov@gmail.com. ORCID 0000-0002-9427-0217

Irina S. Demetrashvili – Process Engineer First Grade,
Branch of JSC UEC NIID, Moscow, Russia.
Email: i.demetrashvili@uecrus.com. ORCID 0009-0002-2363-0198

Sergey A. Kharitonov – Head of the Technology Bureau,
Gorizont Machine-Building Design Bureau (Branch of JSC UEC Gorizont Machine-Building Design Bureau),
Dzer-zhinsky, Russia
Email: s.Kharitonov@uecrus.com